

CUANTIFICACION DE LOS PARÁMETROS ELASTICOS Y MECANICOS DE UN NUEVO DISPOSITIVO DE AISLAMIENTO SÍSMICO

Gustavo Gioacchini

Universidad Tecnológica Nacional. CEREDETEC.
Rodríguez 273, 5500 Mendoza, Argentina.
ggioacchini@frm.utn.edu.ar

Miguel E. Tornello.

Universidad Tecnológica Nacional. CEREDETEC.
Rodríguez 273, 5500 Mendoza, Argentina.
mtornell@frm.utn.edu.ar

Carlos D. Frau.

Universidad Tecnológica Nacional. CEREDETEC.
Rodríguez 273, 5500 Mendoza, Argentina.
cdfrau@frm.utn.edu.ar

RESUMEN

Los terremotos destructivos son uno de los fenómenos naturales que causan anualmente la mayor cantidad de pérdidas de vidas humanas y también económicas. En los últimos años la ingeniería estructural sismorresistente ha desarrollado nuevas estrategias para proteger las construcciones de los terremotos. Una de las más utilizadas es la estrategia del aislamiento sísmico. Los antecedentes indican que el aislamiento sísmico ha sido orientado fundamentalmente a grandes emprendimientos, aspecto que se considera altamente positivo sin embargo, se han omitido muchas obras, ampliamente difundidas y masivas tales como viviendas de uno o dos niveles, edificios comerciales y edificios de departamentos de baja altura, estructuras y equipos industriales de bajo peso, etc. Un proyecto más amplio, actualmente en curso, plantea como objeto el diseño, la fabricación y la caracterización mecánica y elástica de aisladores sísmicos destinados a las obras mencionadas, pero en el presente trabajo se discuten los resultados de la fabricación de distintos prototipos de aisladores elastoméricos. Se estudia un modelo numérico utilizando para los aspectos constitutivos la función de energía propuesta por Ogden. Se compararon los resultados del modelo con ensayos experimentales para sollicitaciones axiales de compresión comprobando una buena correlación de los resultados y de las variables elásticas que dependen del elastómero.

ABSTRACT

Destructive earthquakes are one of the natural phenomena causing annually as much loss of life and economic. In recent years structural engineering seismic has developed new strategies to protect buildings from earthquakes. One of the most used is the strategy of seismic isolation. The record indicates that the seismic isolation has been oriented primarily to large enterprises primarily to large ventures, aspect that is considered highly positive however, many works have been omitted, widespread and massive housing such as one or two levels, commercial buildings and apartment buildings of low rise structures and equipment of low weight, etc. A larger project, currently underway, posed as object design, the fabrication and characterization of mechanical and elastic seismic isolators intended for the works mentioned, but in this paper the results are discussed manufacturing of different prototypes of elastomeric isolators. A numerical model is studied using constitutive energy function given by Ogden. Model results were compared with experimental tests for axial compression stresses checking a good correlation of the results and elastic variables elastomer dependent.

INTRODUCCIÓN

Los terremotos son fenómenos naturales que ocasionan cuantiosos daños materiales y un número significativo de pérdidas de vidas. En muchas regiones del planeta se producen terremotos severos capaces de colapsar estructuras e interrumpir la actividad económica, líneas de comunicación y servicios públicos. Una de las principales causas de las grandes pérdidas es la falta de conocimiento sobre la respuesta de las construcciones frente a terremotos severos, sumado a la incertidumbre del comportamiento de los materiales, tipo de suelos, fundaciones, características de las fuentes generadoras de terremotos, etc., lo cual se traduce en diseños, en parte, no adecuados para afrontar la acción de terremotos destructivos.

Una de las estrategias no tradicionales para controlar el daño en las construcciones es el aislamiento sísmico. El objetivo fundamental de la estrategia es desacoplar la estructura del suelo de fundación con el objeto de que el movimiento del terreno, durante un sismo no sea transmitido a la superestructura y que ella permanezca esencialmente detenida en un marco de referencia inercial, Figura 1. Por cierto, un desacople perfecto entre suelo y estructura es impracticable actualmente, sin embargo, cualquier sistema de aislamiento busca concentrar en él la deformación impuesta por el suelo, filtrando el movimiento que se trasmite hacia la superestructura.

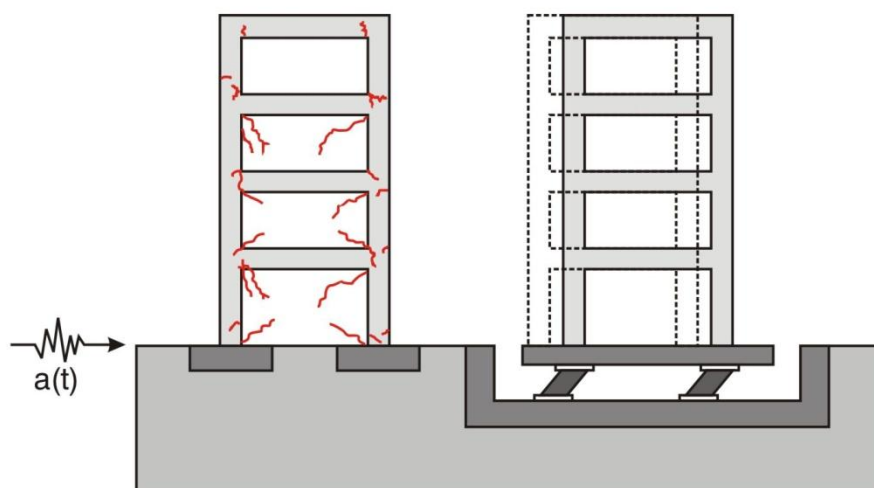


Figura 1. Respuesta de una estructura convencional y una aislada.

La implementación de dispositivos de aislamiento sísmico permite reducir la demanda sísmica sobre las estructuras y asegurar su capacidad de resistencia frente a terremotos destructivos, por lo tanto dichas estructuras muestran un comportamiento elástico ante la ocurrencia de importantes terremotos, situación que garantiza la estabilidad de la estructura aislada, la supervivencia de sus ocupantes y contenidos.

El concepto de aislamiento sísmico es ampliamente aceptado en regiones sísmicas para proteger edificios importantes o que deban cumplir funciones esenciales después de ocurrido el terremoto, de hecho hay muchos ejemplos en Estados Unidos de Norteamérica, Japón, Italia y Nueva Zelanda. También existen proyectos de menor costo para viviendas económicas de los cuales hay casos realmente construidos en Chile, China y Armenia.

Otros de los beneficios importantes de los sistemas de aislamiento es la protección de los contenidos de los edificios (por ejemplo en el caso de hospitales el equipamiento tiene un costo muchas veces mayor que el edificio mismo). Suministrar una mayor resistencia al edificio, en muchos casos, no garantiza valores aceptables de distorsiones de piso o de aceleraciones en altura. Cantidades elevadas de distorsiones de piso causan daños en los componentes no

estructurales y en sus contenidos. Aumentar la rigidez del edificio permitiría disminuir la distorsión de piso, sin embargo ello no garantiza una reducción de las aceleraciones, por otro lado reducir la rigidez del mismo permitiría reducir las aceleraciones pero no las distorsiones de piso. Los sistemas de aislamiento sísmico permiten controlar simultáneamente los dos parámetros porque el mismo posee la flexibilidad necesaria como para concentrar toda la deformación a nivel de los dispositivos de aislamiento. (Tornello, 2007).

Los sistemas de aislamiento sísmico no sólo se han utilizado en obras nuevas sino también en proyectos de edificios existentes. El problema que enfrentan las regiones de países desarrollados y no desarrollados emplazados en zonas de peligro sísmico, no es solamente la amenaza permanente de un terremoto destructivo sino, además, que muchos de sus construcciones (civiles, comerciales, industriales y de infraestructura) fueron construidas con códigos de edificación hoy obsoletos y en muchos otros casos con pocas prescripciones sísmicas. En alguna ocasión el edificio podrá ser demolido y reconstruido, en otros no, ya sea por razones económicas, sociales o históricas. Por lo tanto, hoy, los sistemas de aislamiento sísmico resultan ser técnicas no tradicionales para recuperar dichas construcciones con un grado de seguridad aceptable. (Aguiar *et al.*, 2008, Aguiar 2013, Aguiar *et al.* 2014)

Los antecedentes indican que las técnicas del aislamiento sísmico han sido orientada fundamentalmente a grandes emprendimientos o bien a obras de infraestructura, aspecto que se considera altamente positivo, sin embargo, en países en vías de desarrollo se ha descuidado un gran número de obras, ampliamente difundidas y de construcción masiva (viviendas de uno o dos niveles, edificios comerciales, hoteles y edificios de departamentos de baja altura, estructuras y equipos industriales de bajo peso, equipos de estaciones transformadoras, etc.) que sufren el impacto de un terremoto destructivo de la misma manera que las grandes obras, ocasionando pérdidas económicas y de vidas humanas, retraso socio económico de la región, postergaciones y abandono de las zonas afectadas, etc.

A nivel mundial existen escasos antecedentes sobre el empleo de dispositivos de aislamiento para estructuras de bajo peso. Existen numerosas aplicaciones en aislamiento de equipos industriales y máquinas en general para controlar las vibraciones propias o de otros equipos o bien para reducir los efectos de los terremotos.

Los primeros trabajos relacionados con el aislamiento sísmico de edificios se atribuyen a John Milne quien fuera profesor de la carrera de ingeniería en minería en Tokio entre 1876 y 1895. La estructura fue construida sobre "bolas" contenidas en cajas de acero. Por encima de las mismas existía una placa de acero tomada al edificio cuya superficie de contacto con las bolas era de forma cóncava, otra placa de idénticas características se ubicaba por debajo de las placas de acero. El edificio fue instrumentado y aparentemente ensayado a movimientos sísmicos y las experiencias obtenidas fueron publicadas en 1885 en el informe de la Asociación Británica para el avance de la ciencia. El primer informe contemplaba un diámetro de bolas de 10 pulgadas, al año siguiente, en 1886, el trabajo fue actualizado y se publicaron los resultados para diámetros de bolas de 8, 1 y $\frac{1}{4}$ de pulgadas (Naeim *et al.*, 1999).

La mayoría de los proyectos utilizan casi exclusivamente aisladores conformados por planchas de goma vulcanizadas a láminas de acero y en muchos países (Estados Unidos de Norteamérica y Nueva Zelanda) con núcleo de plomo para mejorar el amortiguamiento de los dispositivos. Muchos proyectos de aislamiento sísmico, particularmente en Nueva Zelanda y Japón, combinan aisladores de goma natural de alto amortiguamiento con amortiguadores hidráulicos, barras de acero retorcidos o núcleo de plomo dentro del aislador elastomérico. Los núcleos de plomo introducen una no linealidad de la respuesta que en parte complican el análisis teórico y por otro lado reducen el grado de aislamiento para los modos superiores de la excitación sísmica (Naeim *et al.*, 1999). Sin embargo, la presencia de los amortiguadores hidráulicos funcionando en paralelo con aisladores, conduce a respuestas eficientes del sistema de aislamiento cuando se está en presencia de terremotos asociados a falla cercana. (Jangid *et al.*, 2001).

Desde hace más de 20 años, los dispositivos de aislamiento sísmico en Japón ya se

han extendido a viviendas. Este hecho caracteriza a Japón en relación a otros países sísmicos del mundo. (Martelli, 2005)

Otros trabajos han realizado análisis teóricos del pandeo de dispositivos de aislamientos elastoméricos para viviendas fabricados con placas de refuerzo de fibras (Fiber-reinforced) en vez de placas de acero, con la intención de reducir los costos del aislador. (Kelly *et al.*, 2012).

Algunos trabajos recientes en países de alto riesgo sísmico han estudiado e implementado el comportamiento de un sistema de aislamiento (PPP) para ser utilizado en construcciones de peso ligero y de bajo costo (Besa, *et al.*, 2010). Otros trabajos han concretado la construcción de una vivienda de un nivel con aislamiento sísmico. Los dispositivos están conformados por elementos de hormigón tipo bielas que cumplen la función de aislar la construcción de las ondas sísmicas. Dichos dispositivos se han instalados junto a dos aisladores elastoméricos que proveen la fuerza restitutiva (Revista BIT, 2010).

Si bien los dispositivos que hoy existen comercialmente pueden también utilizarse para el tipo de construcción mencionada en los párrafos precedentes, los mismos tienen, en general, para los países en vías de desarrollo, los siguientes inconvenientes: i) los dispositivos tienen sus propias patentes, ii) no se fabrican en el país y por lo tanto hay que importarlos con el consecuente incremento de los costos, iii) para amortizar su costo es necesario fabricar un número importante de dispositivos de tal manera que no tenga incidencia relevante en el costo de la construcción; iv) no permite generar desarrollos con tecnología local.

En el presente trabajo se muestran algunos de los resultados del diseño y fabricación de un dispositivo de aislamiento sísmico elastomérico para bajo nivel de carga axial, con el objeto de ser empleado en las construcciones anteriormente citadas. Se discuten los resultados de la modelación numérica del dispositivo de aislamiento y el estudio de la respuesta numérica y experimental de los mismos aisladores bajo carga axial controlada.

1. CARACTERÍSTICAS DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO

Las características geométricas de los aisladores fabricados en el marco del presente trabajo se muestran en la Figura 2. El aislador está conformado por dos pletinas de acero de conexión, inferior y superior, y por un taco de goma de 200 mm de altura.

Para la fabricación de los dispositivos se mezclaron los componentes en una mezcladora mecánica; una vez que el material toma la consistencia deseada es colado en el molde y llevado a la prensa para su vulcanización. Se sometió al compuesto a una presión de 120 toneladas y una temperatura de 150°C por un lapso de tiempo de dos horas. Finalmente se realizó el desmolde de la pieza.

Se tuvo en cuenta las especificaciones recomendadas para que un compuesto base sea utilizado en la fabricación de aisladores sísmicos. Los valores son: Dureza: 60 +/- 10 [shore]; Tensión máxima: > 170 [kg/cm²]; Elongación máxima: > 400 %; Amortiguamiento: > 8 %; Módulo de corte: $7 < G < 8$ [kg/cm²] (Naeim *et al.*, 1999; Aguiar *et al.*, 2013). Algunos de estos parámetros fueron comparados con los resultados de los ensayos realizados sobre el material base de los aisladores.

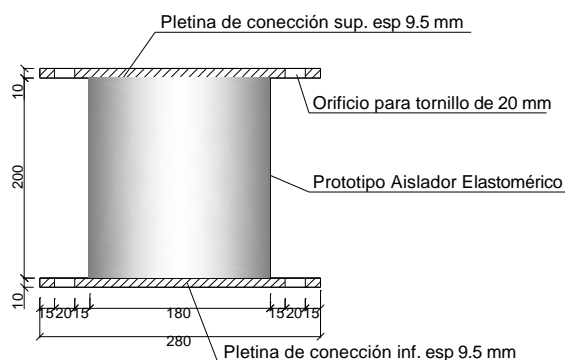


Figura 2. Características del aislador estudiado (Dimensiones en “mm”)

Los componentes y sus respectivas proporciones en el compuesto de goma utilizado para la fabricación de los dispositivos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Componentes del compuesto de la goma utilizada.

| Compuesto de goma 8654 | | | |
|------------------------------|--------------------|---|---------------|
| Componentes (base 1kg) | | Características – propiedades | Cantidad [kg] |
| Elastómero | Neopreno W | Elastómero base | 0,293 |
| | Caucho Natural | | 0,245 |
| Cargas | Negro de Humo FEF | Carga negra altamente reforzante de las propiedades físicas | 0,234 |
| | Sílice Precipitada | | 0,088 |
| Auxiliares de Proceso | | Cumplen la función de ayudar en el proceso de la elaboración de la mezcla | 0,033 |
| Activadores | | Activantes del sistema de vulcanización. | 0,065 |
| Antioxidantes y antiozonates | | Se utilizan como protectores de la degradación por oxidación y calor | 0,027 |
| Catalizadores y reticulantes | | Ejerce propiedades retardantes durante la vulcanización | 0,015 |

Se realizaron los siguientes ensayos al compuesto utilizado en la fabricación de los dispositivos: Dureza, Resistencia a la tracción máxima y elongación a la rotura y Compresión residual. Para realizar dichos ensayos se confeccionaron dos probetas vulcanizadas bajo presión durante 30 minutos.

Para los ensayos de tracción se utilizó la probeta tipo dumbell las cuales se ensayaron con un dinamómetro. En la Figura 3 se observan las probetas y el dinamómetro utilizado. La elongación última que se determinó en el ensayo corresponde a 417% y la tensión de tracción fue de 174.82 Kg/cm². La dureza obtenida fue de 65 shore. Este método de ensayo se basa en la penetración de un indentador específico en el material. La compresión residual obtenida fue de 16.76%, este ensayo tiene como objeto medir la capacidad del compuesto de goma a retener sus propiedades elásticas después de una prolongada compresión.

Los resultados del presente trabajo corresponden a los aisladores sin núcleo confinado. Existen otro grupo de aisladores donde el núcleo del mismo ha sido confinado con distintas técnicas, en algunos casos se ha utilizado una lámina de fibra y en otros casos un tubo de acero con distintos diámetros y espesores. Los resultados de dichos aisladores serán publicados próximamente.



Figura 3. Probetas y ensayos de dureza, tracción y compresión en el material base

Los dispositivos de aislamiento estudiados poseen dos diferencias características en relación a los que habitualmente se utilizan a nivel mundial. La primera es que no poseen las planchas de acero intermedias, vulcanizadas a las capas de goma situación que le confiere las siguientes características: i) se reducen notablemente los costos de fabricación, ii) se reduce su capacidad a carga axial y iii) se reduce la rigidez efectiva de los dispositivos.

La segunda característica está centrada en el núcleo del dispositivo de aislamiento. Mientras que los más frecuentemente utilizados a nivel mundial utilizan en algunos casos núcleos de plomo, los aisladores estudiados en el presente trabajo poseen un núcleo de elastómero confinado con un tubo de acero o bien con láminas de fibras (tela cord). Dicha característica también permite una reducción de los costos de fabricación y además plantea un desarrollo tecnológico diferente al conocido en la actualidad. Si bien los resultados de estos últimos dispositivos serán publicados próximamente, el confinamiento del núcleo de los aisladores busca incrementar el amortiguamiento de los dispositivos.

2. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO NUMÉRICO

Para predecir el comportamiento del dispositivo de aislamiento sísmico diseñado y fabricado, se estudia numéricamente la respuesta mecánica, considerando el comportamiento no lineal de los materiales componentes y la interacción entre ellos a partir de una combinación de cargas ficticias. El modelo hiperelástico utilizado para describir el comportamiento del material elastomérico es el Ogden (Ogden, 1984). Para el acero se utiliza un modelo elástico basado en la Ley de Hooke. Para evaluar el análisis numérico del aislador se utiliza el código comercial ABAQUS (Abaqus, 2003).

2.1 Modelo en elementos finitos del aislador

Para la modelación se utilizaron elementos sólidos deformables en tres dimensiones. Los contactos entre superficies de las placas de acero y taco de goma se definieron con la opción de ABAQUS “*surface-surface*”, especificando superficies maestras (*master*) y esclavas (*slave*), las cuales tienen la característica de que la superficie maestra no puede ser penetrada por la superficie esclava. La interacción de las superficies fue definida para un comportamiento longitudinal y transversal. Para el primero se especificó un comportamiento de contacto rígido o duro (*Hard Contact*), y para el segundo se definió un contacto de fricción. En la Figura 4 se observa el modelo de elementos finitos generado para el aislador estudiado.

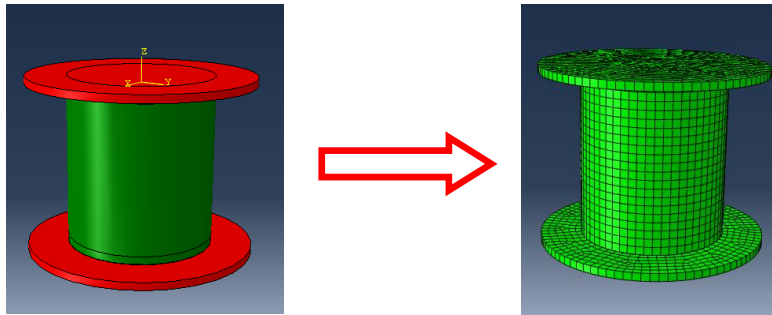


Figura 4. Modelo de elementos finitos utilizado en la plataforma ABAQUS.

2.2 Especificaciones de los materiales utilizados

Los materiales utilizados para la modelación fueron goma y acero. Para el acero se utilizó un modelo elástico isotrópico con un módulo de elasticidad $E=210000$ MPa. Para el elastómero se utilizó el modelo hiperelástico de Ogden (Ogden, 1984). Los parámetros correspondientes al modelo de Ogden se obtuvieron experimentalmente y en forma simultánea mediante ensayos de tracción, compresión y corte, los mismos se resumen en la Tabla 2 (Weinberg, 2010). Se utilizó para el módulo volumétrico un valor de $k = 10000$ MPa, de tal manera que con dicho parámetro los resultados numéricos describen una respuesta prácticamente incompresible.

Tabla 2. Parámetros correspondientes al modelo de Ogden.

| Constantes (MPa) | | | | | | |
|------------------|---------|---------|---------|------------|------------|------------|
| Compuesto | μ_1 | μ_2 | μ_3 | α_1 | α_2 | α_3 |
| Goma | 1 | 0.0012 | -0.01 | 1.3 | 5 | -2 |

2.3 Modelo hiperelástico utilizado para el elastómero.

El modelo constitutivo utilizado para simular el comportamiento del elastómero está basado en la función de energía propuesta por Ogden (Ogden, 1984; Núñez y Celentano, 2005; Bellomo *et al.*, 2008).

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} \left(\lambda_1^{\frac{\alpha_i}{2}} + \lambda_2^{\frac{\alpha_i}{2}} + \lambda_3^{\frac{\alpha_i}{2}} - 3 \right) \quad (1)$$

Donde N es un número entero positivo y μ_i, α_i son parámetros del material que se determinan en base a una serie de ensayos experimentales. Las deformaciones están parametrizadas por los estiramientos principales λ_A dados por:

$$\lambda_A = (\text{eig}_A(C))^{1/2} = (\text{eig}_A(B))^{1/2} \quad (2)$$

Donde los autovalores se obtienen a partir del tensor derecho de Cauchy-Green C ó del tensor izquierdo de Cauchy-Green B . Debido a la cuasi-incompresibilidad que presentan los elastómeros se realiza una descomposición multiplicativa del tensor gradiente de deformación en sus partes volumétrica (F_{vol}) y desviadora (\bar{F}).

$$F = F_{vol} \bar{F}, \quad F_{vol} = J^{1/3} I, \quad \bar{F} = J^{-1/3} F \quad (3)$$

Donde $J = \det[F] = \det[F_{vol}]$, $\det[\bar{F}] = 1$. En adelante, una variable sobre-lineada ($\bar{\bullet}$) indica que se trata de la parte desviadora de la misma.

Mediante esta descomposición, la energía de deformación se puede expresar a través de una descomposición aditiva de sus partes volumétrica y desviadora:

$$W = W(J) + \bar{W}(\bar{C}) \quad (4)$$

Donde C es la parte desviadora del tensor derecho de Cauchy-Green, $C = FTF$. Asociada con la deformación volumétrica se tiene, en la configuración actualizada, una presión hidrostática p , dada por:

$$p = W'(J) \quad (5)$$

Aplicando la descomposición indicada en la ecuación (3) el equivalente de la ecuación. (4), en estiramientos principales, resulta:

$$W(\lambda_i) = W(J) + W^*(\lambda_i^*) \quad (6)$$

Donde $W(J)$ describe la energía libre asociada al cambio de volumen del sólido y $W^*(\lambda_i^*)$ la asociada a las deformaciones isocóricas (a volumen constante).

El potencial en función de los estiramientos modificados se expresa como:

$$W^*(\lambda_i^*) = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad \lambda_i^* = J^{-1/3} \lambda_i \quad (7)$$

Partiendo de la derivación de la función de energía dada por la ecuación (6) y aplicando la regla de la cadena se obtiene el segundo tensor de tensiones de Piola-Kirchhoff S :

$$S = 2 \sum_{A=1}^3 \frac{\partial W^*(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)}{\partial \lambda_A} \frac{\partial (\lambda_A)^2}{\partial C} \frac{1}{\lambda_A} + JW'(J)C^{-1} \quad (8)$$

En la ecuación (8) la tensión total S resulta desacoplada en sus partes desviadora \bar{S} y volumétrica S_v dadas, respectivamente, por:

$$\bar{S} = 2 \sum_{A=1}^3 \frac{\partial W^*(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)}{\partial \lambda_A} \frac{\partial (\lambda_A)^2}{\partial C} \frac{1}{\lambda_A} \quad S_v = JW'(J)C^{-1} \quad (9)$$

El tensor C puede escribirse aplicando descomposición polar, como:

$$C = \sum_{A=1}^3 \lambda_A N_A \otimes N_A \quad (10)$$

Donde λ_A son, como se expresó anteriormente, los estiramientos principales y N_A son los respectivos autovectores (Simo, J., 1993). De la ecuación (10) se obtiene:

$$\frac{\partial (\lambda_A)^2}{\partial C} = N_A \otimes N_A \quad (11)$$

Donde $\{N1, N2, N3\}$ son ortogonales y definen un sistema rectangular de vectores unitarios. Finalmente resulta:

$$\frac{\partial W^*(\lambda_i^*)}{\partial \lambda_A} = \sum_{i=1}^N \mu_i J^{1/3} \left(\lambda_A^{\alpha_i} - \frac{1}{3} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i}) \right) \quad (12)$$

Si se reemplazan las ecuaciones (11) y (12) en la ecuación (9), se obtiene para la parte desviadora del tensor de tensiones, la siguiente expresión:

$$\bar{S} = \sum_{A=1}^3 \left(\sum_{i=1}^N \mu_i J^{-\alpha_i/3} \left(\lambda_A^{\alpha_i} - \frac{1}{3} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i}) \right) \right) N_A \otimes N_A \frac{1}{\lambda_A} \quad (13)$$

Procediendo de forma análoga, se puede expresar la parte desviadora del tensor de tensiones de Cauchy σ en la forma:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{J} \sum_{A=1}^3 \left(\sum_{i=1}^N \mu_i J^{-\alpha_i/3} \left(\lambda_A^{\alpha_i} - \frac{1}{3} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i}) \right) \right) \frac{1}{\lambda_A} F N_A \otimes N_A F^T \quad (14)$$

Se han propuesto varias expresiones para caracterizar la energía interna asociada al cambio de volumen (Crisfield, 1996). La expresión utilizada en los desarrollos de este trabajo está dada por:

$$W(J) = \frac{1}{2} k (J - 1)^2 \quad (15)$$

Donde k es el módulo volumétrico del material en la configuración de referencia. Teniendo en cuenta la ecuación (15) y considerando S_v positiva para compresión se obtiene:

$$S_v = -Jk(J - 1)C^{-1} \quad (16)$$

Las expresiones finales de las tensiones, en las configuraciones de referencia y actualizada, resultan respectivamente dadas por:

$$S = \sum_{A=1}^3 \left(\sum_{i=1}^N \mu_i J^{-\alpha_i/3} \left(\lambda_A^{\alpha_i} - \frac{1}{3} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i}) \right) \right) N_A \otimes N_A \frac{1}{\lambda_A} - Jk(J - 1)C^{-1} \quad (17)$$

2.4 Condiciones de borde del modelo numérico

El modelo de elementos finitos fue restringido a los desplazamientos en las tres direcciones. La restricción se impuso en la parte inferior del aislador, en coincidencia con la platina de conexión inferior. El modelo fue analizado para tres desplazamientos verticales: 2; 3 y 5 cm. En la Figura 5 se observa el modelo del aislador elastomérico deformado bajo carga axial con deformación vertical controlada. Las respuestas obtenidas fueron comparadas con los resultados obtenidos experimentalmente. La misma Figura 5, muestra la similitud de respuesta entre el modelo y los ensayos.

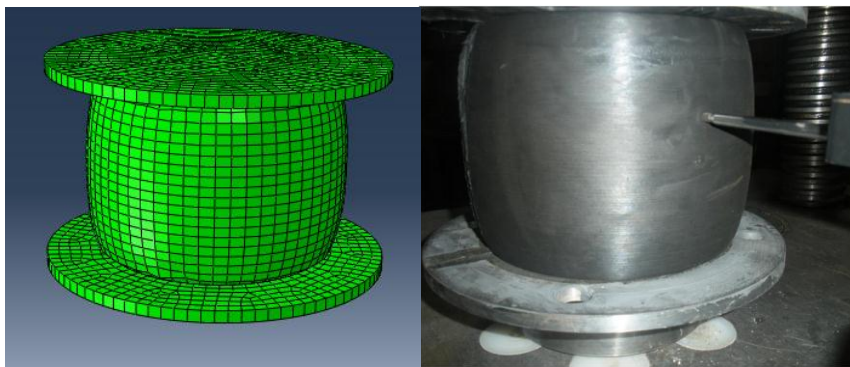


Figura 5. Modelo del aislador elastomérico baja carga axial de compresión y ensayos experimentales para carga normal.

3. RESULTADOS

Para cada uno de los tres desplazamientos verticales (2, 3 y 5 cm), se obtuvieron, para el modelo numérico del aislador, las curvas fuerza-desplazamiento. La Figura 6 muestra la curva para un desplazamiento vertical controlado de 5 cm.

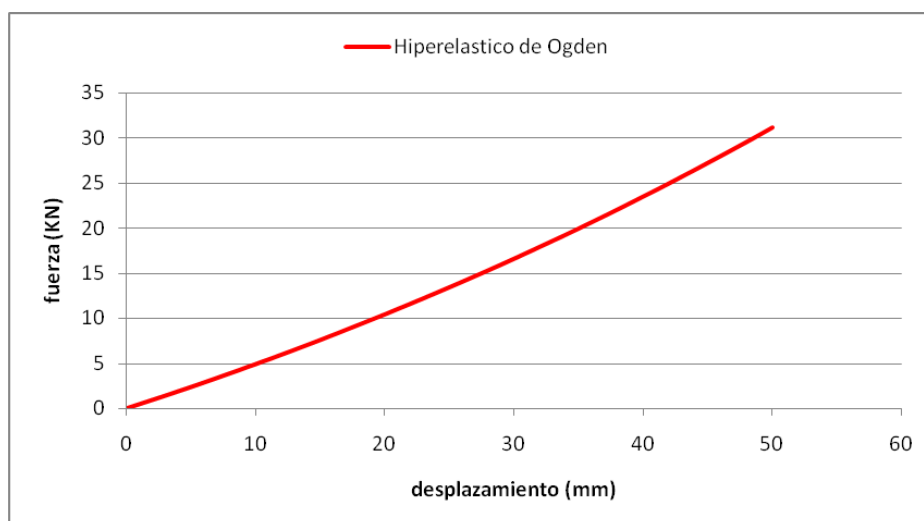


Figura 6. Curva fuerza – desplazamiento del modelo numérico para una deformación controlada de 50mm.

En la Figura 7, se muestran superpuestas las curvas fuerza-desplazamiento correspondiente a los resultados numéricos utilizando el modelo de Ogden y resultados obtenidos experimentalmente. De la gráfica se deduce una buena correlación entre los resultados experimentales y numéricos,

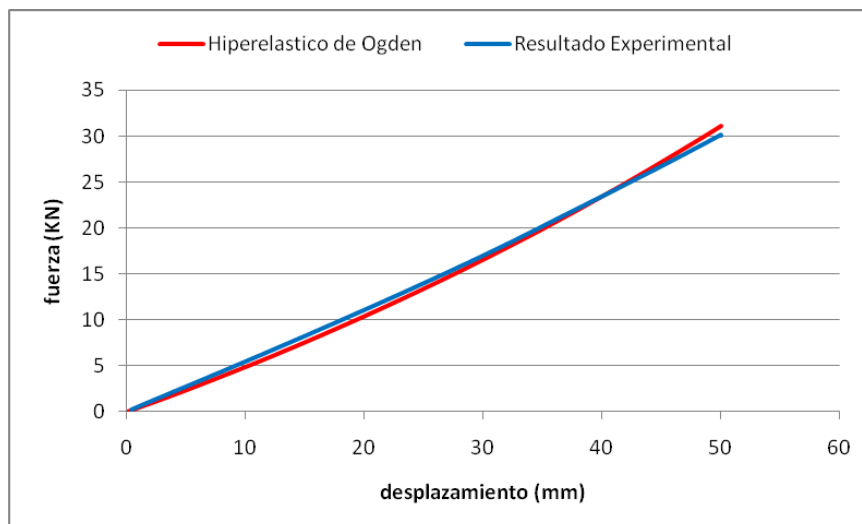


Figura 7. Curva “Fuerza – desplazamiento” obtenida del modelo numérico y resultados experimentales para una deformación controlada de 50 mm.

En las Figuras 8 y 9 se muestra la distribución de tensiones de Mises, para el modelo hiperelástico de Ogden para un desplazamiento de 2 y 5 cm. respectivamente.

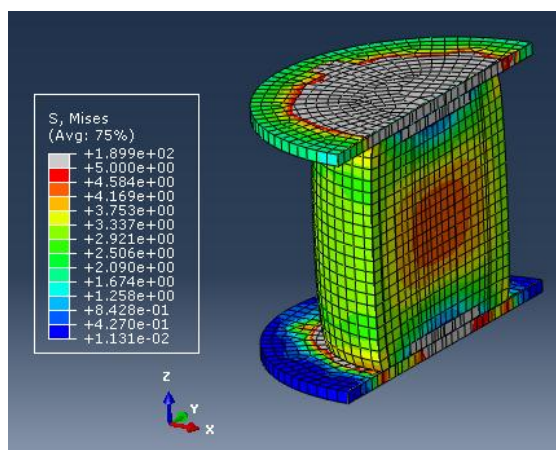


Figura 8. Estado de tensiones [kg/cm²], para un desplazamiento vertical de 2 cm.

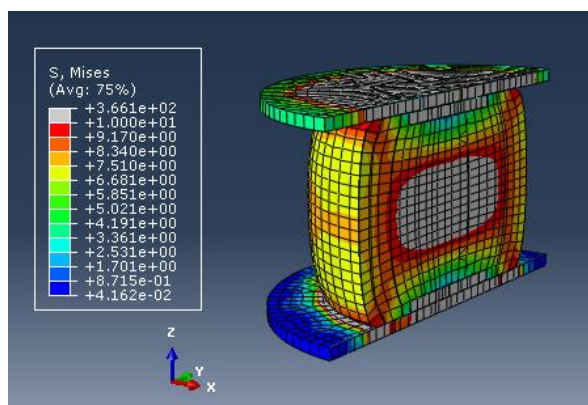


Figura 9. Estado de tensiones [kg/cm²], para un desplazamiento vertical de 5 cm.

Los resultados indican que las tensiones máximas se encuentran en la unión de las placas de conexión superior e inferior con el taco de goma del aislador. Se observa también un crecimiento de las tensiones desde el núcleo de la goma hacia el exterior. Dicha respuesta es más evidente para mayores desplazamientos verticales. Los resultados indican que el modelo numérico de Ogden representa adecuadamente el comportamiento de los dispositivos a carga vertical para carga axial y desplazamientos verticales controlados.

En el diseño de los aisladores se han previstos desplazamientos máximos de 100 mm para un análisis de norma y para un espectro de respuesta correspondiente a un suelo de calidad intermedia. Se buscan amortiguamientos de los dispositivos de aislamiento próximos al 10% con el objeto de controlar el desplazamiento de las construcciones y reducir los cortes basales a nivel de los dispositivos de aislamiento. Las dimensiones de los mismos se definirán para lograr periodos de las construcciones aisladas cercanos a los 1.50 segundos.

Las próximas etapas del trabajo se centraran en evaluar, experimentalmente, la respuesta de los aisladores a cargas horizontales cíclicas y verificar si el modelo numérico de Ogden es adecuado para representar el comportamiento del aislador a cargas horizontales y verticales simultáneas. En la Figura 10 se observa la curva fuerza-desplazamiento correspondiente a los resultados numéricos del modelo de Ogden para carga cíclica horizontal y carga vertical simultánea para un desplazamiento lateral máximo de 10 cm. La Figura 10 muestra un amortiguamiento bajo sin embargo se hace notar que los resultados corresponden a un aislador elastomérico sin núcleo confinado.

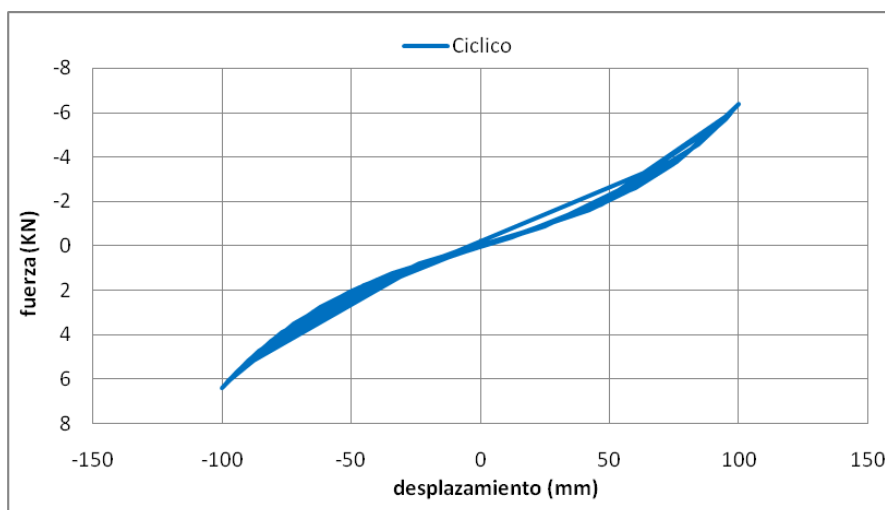


Figura 10. Curva fuerza – desplazamiento del modelo numérico para carga cíclica horizontal y vertical simultánea.

4. CONCLUSIONES

Los ensayos realizados al compuesto de goma utilizado en la fabricación de los prototipos de aislamiento sísmico arrojaron buenas aproximaciones con los valores recomendados por la bibliografía para los dispositivos de aislamiento sísmico estudiados en el presente trabajo.

Los resultados experimentales bajo carga axial y desplazamiento controlado (hasta 50 mm) muestran una muy buena aproximación con los resultados numéricos obtenidos con el modelo hiperelástico de Ogden.

Las curvas fuerzas – desplazamientos obtenidos con el modelo numérico propuesto en el trabajo y las obtenidas con los ensayos experimentales presentan muy buenas correlaciones, situación que ha permitido validar el modelo numérico utilizado.

El modelo numérico de Ogden ha permitido obtener la constitutiva del aislador estudiado en el presente trabajo en el formato fuerza-deformación, para un desplazamiento lateral controlado máximo de 10 cm. Los resultados obtenidos deberán verificarse a través de ensayos experimentales en futuras etapas de la investigación.

REFERENCIAS

1. Abaqus 6.4-1. *Theory Manual*. Hibbit, Karlson and Sorenson, Inc.: Pawtucket, U.S.A., 2003.
2. Aguiar R., Vergara F., Guaygua B., Monge P., (2014) "Análisis sísmico de una estructura con aisladores FPS de primera y segunda generación y elastoméricos con núcleo de plomo", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **19 (3)**, 35-89.
3. Aguiar R., (2008), *Microzonificación sísmica de Quito*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia IPGH, Primera edición, 212 p. Quito.
4. Aguiar R., Almazán J. L., Dechent P., Suárez V., (2008), *Aisladores de base Elastoméricos y FPS*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 292 p., Quito, Ecuador.
5. Aguiar R., Auqui M., Garzón N., Navas F., (2013), "Primeras experiencias de aisladores elastoméricos producidos en el Ecuador", *Revista Ciencia*. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, **13 (2)**, 103-118, Quito, Ecuador.
6. Bellomo F., Nallim G., Oller S., (2008), "Modelo para el análisis del comportamiento mecánico de materiales compuestos de matriz elastomérica reforzada". *Mecánica Computacional*, Vol XXVII, págs. 593-613 Alberto Cardona, Mario Storti, Carlos Zuppa. (Eds.) San Luis.
7. Besa, J., de la Llera J. C., Jünemann R., (2010), "Experimental behavior and design of a new kinematic isolator". *Engineering Structures*, Vol.**32**, 508-522.
8. Crisfield, M.A., (1996), *Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*. John Wiley & Sons, Volume II: Advanced Topics.
9. Jangid R. S., Kelly J. M., (2001), "Base Isolation for near-fault motions". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30:691-707. 16.
10. Kelly J. M., Calabrese A. y Serino G., (2012), "Design criteria for Fiber Reinforced Rubber Bearings". *15WCEE*, Lisboa.
11. Martelli A., (2005). "Modern seismic protection systems for civil and industrial structures". *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. IX Jornadas*.
12. Naeim F., Kelly J. M., (1999), *Design of seismic isolated structures*. Editorial J. Wiley and Sons. INE.
13. Núñez C. A. y Celentano D. J., (2005), "Caracterización experimental y numérica de compuestos elastoméricos utilizados en disipadores de energía". *Mecánica Computacional* Vol. XXIV A. Larretguy (Editor) Buenos Aires.

14. Ogden R., (1984), *Non-linear elastic deformations*, Dover Publications, New York.
15. Revista BIT, Especial terremoto Chile 2010. (2010), Aislación y disipación de energía. mayo2010. (Disponible online [www.fiic.la/lxv consejo directivo panama/delallera 2.pdf](http://www.fiic.la/lxv_consejo_directivo_panama/delallera_2.pdf)).
16. Simo, J. C., (1993) *Topics on the Numerical Analysis and Simulation of Plasticity. Handbook of Numerical Analysis, Elsevier Science Publishers*, Vol. III.
17. Tornello M., (2007), *Aislamiento sísmico de base en construcciones civiles, emplazadas en zonas de alto riesgo sísmico*. Director: Dr. Sarrazin A. M. Tesis Doctoral. Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza.
18. Weinberg K., (2010) *Lecture Notes for Zur Methode der finiten Elemente in der Mechanik II Probleme*, (Disponible online <http://mechanik.tu-berlin.de/weinberg/Lehre/fem2/Chapter4.pdf>).